

南海地震防災のための地方都市モデルの構築

三神 厚¹

Simplified Ground Modeling and Soil Investigation for Wide-Area Ground Response Analysis

by
Atsushi MIKAMI

Abstract

This study proposes a method of combining microtremor measurements and simple ground modeling. From microtremor measurements conducted on a ground surface, H/V spectral ratios are calculated. Then, a multi-layered soil deposit is replaced with an equivalent homogeneous ground underlain by bedrock. Showing that the simple ground model is suitable to be used in a low frequency range, the ground is attributed to further simplified ground model. Similar computational results are obtained for eigen analysis of multi-layered, irregularly bounded ground between the proposed method and three dimensional finite element method.

Key words: Microtremor Measurement, Ground Response Analysis,
Quasi-Three-Dimensional Ground Model, Underground Structure, Simplified Model

1. まえがき

地中構造物は慣性力の影響が小さく、地震時において周辺地盤に追従して挙動する。そのため、地中構造物の耐震性を評価するにあたっては、地震時における地盤の挙動をできるだけ正確に把握することが重要である。

線状地中構造物の長手方向の解析は、縦断面による2次元解析で行われることもあるが、地形や地質が複雑な場合やトン

ネルが直線状でない場合には、3次元的地盤の挙動を考慮できる方法を使用する必要がある。3次元有限要素解析などの精緻な計算手法を用いて地盤の地震応答を評価する場合、すべてのメッシュの入力データ(地盤情報)をPS検層結果などをもとに正確に与えることができれば、計算精度は非常に高くなるものと考えられる。しかし実際には、解析領域に対して数点でPS検層がなされ、その結果を内挿あるいは外挿して用い、地盤のメッシュデータを用意することになる。地盤構造が理想的な水平成層構造であるならばそれでもメッシュデータの精度は期待できるであろうが、複雑な地形、地質条件の場合には、入力データの精度が望めない。結果として、たとえ精緻な数値解析手法を用いて地盤の地震応答を評価しても解析結果の精度には結びつかない。

そこで本研究では、線状地中構造物の長手方向の挙動を3

1 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
Department of Civil and Environmental Engineering,
The University of Tokushima
*連絡先：〒770-8506 徳島市南常三島町2-1
徳島大学工学部建設工学科

次元的に評価するにあたり、解析に必要な入力データを作成するための簡易な地盤調査と、それとの精度や簡便さにおいてバランスの取れた3次元地盤モデル化手法を組み合わせる方法を提案する。

具体的には、地盤調査として常時微動を地表の単点において測定する労力の少ない方法を用いる。水平2成分と鉛直1成分の常時微動を10分程度観測し、得られる水平と鉛直成分のスペクトル比(H/Vスペクトル比) をとり、それを利用するものである。この方法は、非常に簡単で労力もかからないので、地盤調査が広域にわたる場合に対しても適用可能である。

このようにして得られた簡単なモデルではあるが、1次モードをカバーする程度までの低い周波数帯であれば、多層地盤の応答特性を近似することができることを示す。その上で、さらなる簡便化として、地盤深さ方向の振動モードを1次のモードに固定する。その結果、得られる地盤モデルは、田村らによって提案された擬似3次元地盤モデル¹⁾と基本的に同じものである。また有限要素解析モデルの一種である。違いは、擬似3次元地盤モデルが多層地盤の固有振動モードから1次のモードを直接的に抽出するのに対し、本研究で提案するモデルは、地盤調査として常時微動の使用を前提としているため、多層地盤を卓越振動数の等しい等価な一様表層地盤に置き換え、その上で、深さ方向のモードを特定している点である。解析例として、不整形な多層地盤の固有値問題を考え、3次元有限要素法の入力データとして多層地盤のデータを与えた場合と、提案する簡便モデルに卓越振動数が各地点ごとに与えられた場合の解析結果を比較する。

2. 常時微動を用いた簡便な地盤調査

簡便な地盤調査手法として、本研究では常時微動測定を用いる。地表の単点における常時微動測定を行い、水平2成分、鉛直1成分の合計3成分の常時微動を約10分間観測する。中村の方法²⁾に基づき、H/Vスペクトル比を考える。この方法は簡単で、コストや重労働を要しない優れた方法として知られている。

2.1 常時微動の測定方法

KiK-netのようなPS検層結果が得られているサイトにおいて常時微動測定を実施した³⁾。サイトの選定にあたっては、山地を避け、できるだけ平野部のサイトを選んだ。特にここでは、表層と基盤とのインピーダンスのコントラストが明瞭で、H/Vスペクトル比のピークが表れやすいサイトを適用対象として検討する。微動測定には、東京測振のサーボ型速度センサー(VSE-15D)と携帯型データ観測システム(SPC-35)を用いた。各サイトにおいて、100Hzサンプリングで、約10分間の測定を実施した。

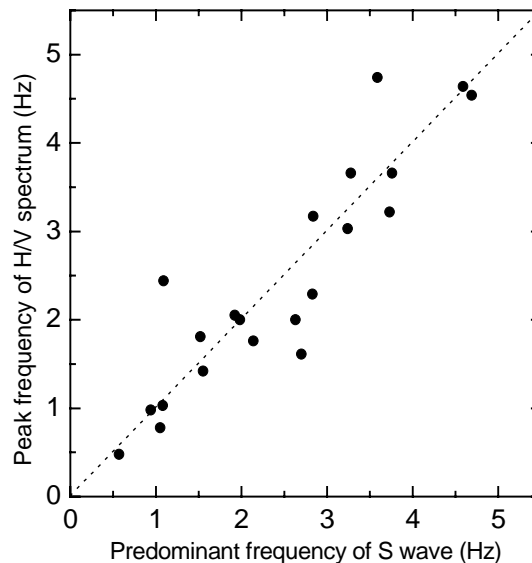


Fig.1 Predominant frequency

2.2 H/Vスペクトル比

3成分の時刻歴微動データをフーリエ変換し、パワースペクトルを用いる。バンド幅0.4(Hz)のParzenウィンドウを用いて各成分ごとに平滑化する。平滑化したパワースペクトルの比をとり、H/Vスペクトル比を計算する。

2.3 解析結果

Fig.1は、1/4波長則に基づきS波の卓越振動数を計算した結果(横軸)と常時微動のH/Vスペクトル比のピーク振動数(縦軸)との関係をプロットしたものである。点線は、それらの値が等しいことを示すが、プロットした結果は、ほぼ点線上に載っており、あるサイトにおける地盤の卓越振動数は、地表の単点における常時微動測定から推定できることを示唆している。同様な結果は、大町ら⁴⁾によっても示されており、地表の単点における常時微動測定からあるサイトの卓越振動数が得られることについては、周知の事実である。

本研究では、多層からなる実地盤を、それと卓越振動数の等しい基盤上の一様表層地盤で置き換える(表層厚 H 、表層の平均S波速度 \bar{V}_s)ことを考えるが、卓越振動数がわかっていても、 \bar{V}_s と H がトレードオフの関係にあるので、これらを同時に決定することはできない。同様なことは、表面波の波動場を仮定してH/Vスペクトル比の理論曲線を考え、それが常時微動のH/Vスペクトル比に適合するようにS波速度や基盤深さを決定する場合にも言える。

近年、地盤情報データベース⁵⁾が整備されてきているので、本研究では、基盤までの深さ H の値がボーリングデータなど

から別途推定できるという前提を設ける。これにより、各地点における堆積地盤の平均的なS波速度 \bar{V}_s は、常時微動測定から得られる卓越振動数から推定することができる。このようにして、多層地盤を基盤上の一様表層地盤で置き換えたものは、地盤の卓越振動数が等しいという意味で「等価」である。

次のセクションでは、このようにして決定された「等価」簡易地盤モデル(基盤上の一様表層地盤)によって実地盤(多層地盤)の増幅特性を表現できるか検討する。

3. 等価な地盤を用いたサイト応答関数の評価

以上の方法により、多層地盤は、その卓越振動数が等しい「等価」な基盤上の一様表層地盤に置き換えられた。ここでは、置き換えられた簡易な2層地盤モデルの適用の限界について検討する。

Fig.2は、1次元解析によって求めた多層地盤と簡易2層地盤のサイト応答関数の一例で、多層地盤モデルとして大崎⁶⁾を用いた。横軸に周波数を取り、縦軸に露頭基盤から表層までの増幅をとっている。実線が多層地盤による結果、点線が簡易地盤による結果である。この例では、双方の地盤モデルとも約3(Hz)あたりに1次モードのピークが表れている。ピーク周波数の位置が一致するのは当然である。ピークの高さは地盤のインピーダンス比に依存するが、ほぼ一致している。種々の地層構造を考えて解析を行ってもほぼ同様な結果が得られた。同様な検討は、Matsudaら⁷⁾においても行っている。なお、ここでは、減衰の値は両方で一致させている。

2つの地盤モデルによる伝達関数の一致度について検討すると、1次モード周辺までは良く一致しているが、それより高次のモードではピークが表れる周波数の位置、ピークの高さとも一致しなくなる。この結果は、簡易な地盤モデルは実地盤(多層地盤)の1次モード程度までは精度よく近似するので、地盤の深さ方向に対し、1次モードを仮定し、さらに地盤モデルを簡便化する方法が考えられる。

そこで次のセクションでは、深さ方向に対し、1次の振動モードに固定する場合のモデルをNogamiら⁸⁾の定式化を参考に導く。

4. 帰着される簡便で効率的な地盤モデル

4.1 簡便な地盤モデルへの帰着

3次元地盤の支配方程式は以下のようになる。

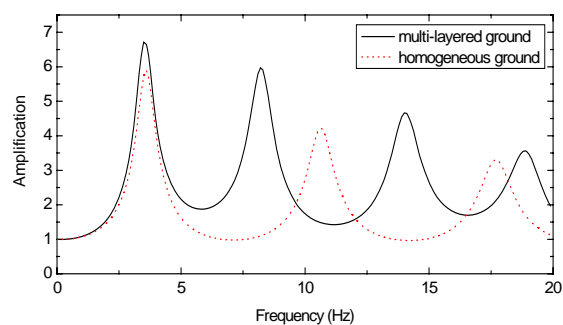


Fig.2 Transfer functions

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\end{aligned} \quad (1)-(3)$$

ここで、 σ_{ij} = 応力成分、 ρ = 地盤密度、 $u, v, w = x, y, z$ 方向の変位成分

つり合い方程式を変位に関する式に変換し、かつ、上下動を無視すると以下ようになる。

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right] \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right]\end{aligned} \quad (4), (5)$$

変数分離 $u = U(x, y, t)\phi(z), v = V(x, y, t)\phi(z)$ を適用する。

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \phi = & (\lambda + \mu) \phi \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \mu \phi \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) U + \mu U \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} U \\ \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \phi = & (\lambda + \mu) \phi \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \mu \phi \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) V + \mu V \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} V \end{aligned}$$

(6), (7)

Nogamiら⁸⁾のようにz方向に対してGalerkinの方法を適用する。

$$\begin{aligned} \int_0^H \left(-\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \phi + (\lambda + \mu) \phi \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \mu \phi \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) U \right. \\ \left. + \mu U \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} U \right) \phi dz = 0 \\ \int_0^H \left(-\rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \phi + (\lambda + \mu) \phi \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \mu \phi \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) V \right. \\ \left. + \mu V \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} V \right) \phi dz = 0 \end{aligned}$$

(8), (9)

最後の2項に部分積分を適用すると、最終的に以下ようになる。

$$\begin{aligned} \rho^* \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + k^* U = (\lambda + \mu)^* \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \mu^* \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) U \\ \rho^* \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + k^* V = (\lambda + \mu)^* \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \mu^* \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) V \end{aligned}$$

(10), (11)

ここで、 $\rho^*, k^*, (\lambda + \mu)^*, \mu^*$ は以下のように表わされる。

$$\rho^* = \int_0^H \rho \phi^2 dz$$

$$\begin{aligned} k^* &= \int_0^H \mu \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 dz \\ (\lambda + \mu)^* &= \int_0^H (\lambda + \mu) \phi^2 dz \\ \mu^* &= \int_0^H \mu \phi^2 dz \end{aligned}$$

(12)-(15)

これらの式は、Nogamiら⁸⁾や田村ら⁹⁾と同じ形をしている。ただし、田村ら⁹⁾では、上下動を無視する代わりに上下方向の直応力を0とし、平面応力的にLameの定数の設定を以下のように変化させることで、先に無視した上下動の影響を擬似的に取り込む方法を採用している。

$$\lambda \rightarrow \frac{2\lambda\mu}{\lambda + 2\mu} \quad (16)$$

一方、2次元の式は以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) u \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) v \end{aligned}$$

(17), (18)

これらの数式を比較すると、違いは k^*U と k^*V の項だけであることがわかる。これらの項は、基盤に対する地表面レベルの水平方向相対変位 U, V による復元力である。

4.2 有限要素定式化

以下では、本研究で提案する簡便な地盤モデルの有限要素定式化を行う。まず、支配方程式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + ku \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + kv \end{aligned} \quad (19), (20)$$

重み関数 w_x, w_y を乗じ、解析領域について積分すると以下
のようになる。

$$\begin{aligned} \int_S w_x \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dS + \int_S w_x \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} dS &= \int_S w_x \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dS + \int_S w_x k u dS \\ \int_S w_y \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} dS + \int_S w_y \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} dS &= \int_S w_y \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} dS + \int_S w_y k v dS \end{aligned} \quad (21), (22)$$

数式を整理すると

$$\begin{aligned} &\int_V \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} \sigma_{xx} + \frac{\partial w_x}{\partial y} \sigma_{xy} \right) dV \\ &= \int_S w_x t_x dS - \int_V w_x \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dV - \int_V w_x k u dV \\ &\int_V \left(\frac{\partial w_y}{\partial x} \sigma_{yx} + \frac{\partial w_y}{\partial y} \sigma_{yy} \right) dV \\ &= \int_S w_y t_y dS - \int_V w_y \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} dV - \int_V w_y k v dV \end{aligned} \quad (23), (24)$$

これらの和をとると

$$\begin{aligned} &\int_V \{ \nabla w \}^T \{ \sigma \} dV = \\ &\int_S \{ w \}^T \{ t \} dS - \int_V \{ w \}^T \{ \rho \ddot{u} \} dV - \int_V \{ w \}^T \{ k u \} dV \end{aligned} \quad (25)$$

変位ベクトル $\{u\}$ と重み関数 $\{w\}$ を形状関数 $[N]$ を用いて
近似すると、最終的に、以下のようになる。

$$\begin{aligned} &\int_V \rho [N]^T [N] dV \{ \ddot{u} \} + \int_V [B]^T [D] [B] dV \{ a \} + \int_V k [N]^T [N] dV \{ a \} \\ &= \int_S [N]^T \{ t \} dS \end{aligned} \quad (26)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \{u\} &= [N] \{a\} \\ \{w\} &= [N] \{c\} \end{aligned} \quad (27), (28)$$

ここで、 $\{a\}$ は離散点の変位の値である。また、 $\{c\}$ は任意
の値である。

5. 解析例

地盤モデルの簡便化に伴い、その適用の限界について検討
する必要があるが、本研究では、線状地下構造物の長手方向
へのモデルの適用に主眼を置いているため、基盤が傾斜し、
表層地盤変位分布が急変するような不整形地盤構造で最も単
純なものを解析例に選んだ。具体的には、基盤が不整形な水
平成層地盤の固有値問題を考え、ここで提案する簡便な地盤
モデル化手法で解析した結果を3次元有限要素法による結果
と比較する。地盤の不整形形状のパターンは多種多様である
が、より一般的な不整形地盤への対応については今後の課題
とする。

5.1 不整形地盤モデル

Fig.3,4 に示す不整形な地盤を解析対象とする。境界条件は、
底面においてフラットな基盤面が1000(m)あり、傾斜した部分
(400m)に接続している。四方の側面は固定境界である。堆積
地盤は、5層からなり、各層の厚さは60(m)である。層ごとの
せん断波速度はFig4 に示す通りである。地盤密度とポアソン
比は層ごとに一定で、それぞれ、1800(kg/m³)、0.4とする。

3次元有限要素解析におけるモデル化では、地盤の要素には、
8節点ソリッド要素を用い、ガウス積分点の数は2点とした。

一方、簡便モデルでは、堆積層厚の等しい土柱単位で多層
地盤の卓越振動数と等しい卓越振動数を有する一様表層地盤
の1次モードを考え、2次元モデル化していることになり、4節
点の四辺形アイソパラメトリック要素を用い、ガウス積分の
分点の数は2とした。

5.2 3次元有限要素法による解析結果

固有値解析の結果、1次の固有振動数は、0.7618(Hz)とな
った。1次の固有振動モードをFig5 に示す。振動モードの鉛
直成分も表れていることがわかる。Fig6 は、同じく1次の振
動形について、地表面を真上から見たものである。これらの
結果から、基盤がフラットなセクションの傾斜基盤に近い側
において変位が大きくなり、基盤傾斜部で急変していること
がわかる。

5.3 簡便な地盤モデルによる解析結果

固有値解析の結果、上下動を単純に無視した場合の基本振

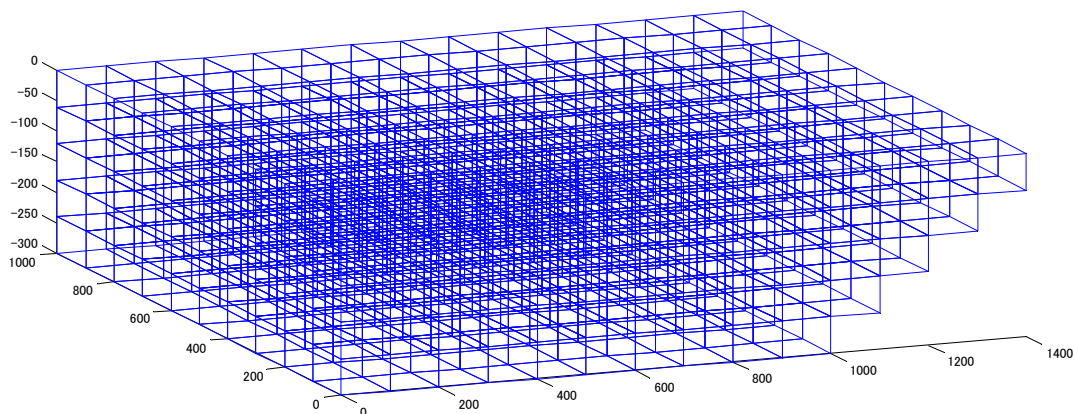


Fig.3 Irregularly bounded soil model (unit : m)

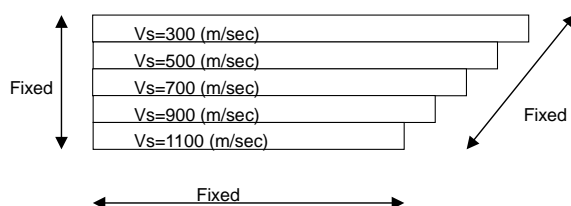


Fig.4 Soil profile

動モードの固有振動数は、0.8608(Hz)で、3次元解析に比べ、やや高い結果となった。そこで、上下動を擬似的に考慮する田村ら⁸⁾の方法を用いて同じ解析を行った結果、0.8465(Hz)となり、幾分改善がみられた。ともに幾分高めの固有振動数の評価となった要因としては、本手法において多層地盤を卓越振動数が等しい等価地盤に置き換えた後、地盤深さ方向の振動モードを基本モードに固定したことによる影響が考えられる。振動モードについては、Fig.7, 8にそれぞれ上下動無視(plane-strain)と上下動を擬似的(plane-stress)に考慮した場合を示す。ともに、3次元有限要素解析の場合と同様、基盤がフラットなセクションの傾斜基盤側の部分で変位が大きくなり、基盤傾斜部で急変する結果が得られた。計算時間は3次元解析に比べはるかに少ない。当然ではあるが、この場合には、上下動は表れていない。また、短手方向についても、3次元解析と同様な振動モードのパターンが得られている。

6. まとめ

本研究では、常時微動を用いた簡易な地盤調査と、精度や

簡便さの上で調査手法とバランスの取れた地盤モデル化手法とを組み合わせた方法を提案した。地表の単点で観測された常時微動のH/Vスペクトル比を基盤深さが既知という仮定のもと用いることで、実地盤と卓越振動数の等しい基盤上の等価一様地盤でモデル化できる。そのようにして得られた等価一様地盤は、実地盤の高次の振動特性は近似し得ないが、低次の振動特性を比較的精度よく近似するという知見を利用して、ここでは、深さ方向の振動モードを1次モードに固定することで、地盤モデルのさらなる簡便化を図った。このようにして得られたモデルは、田村らによってすでに提案されている擬似3次元地盤モデル(Q3D Model)に類似するものである。不整形な多層地盤の固有振動モードを解析例として検討すると、簡便モデルを簡単な地盤情報とともに用いた場合の解析結果は、3次元有限要素法と詳細な地盤情報の組み合わせによって得られる結果を概ね近似するものとなった。

謝 辞

本研究を実施するにあたっては、平成21年度徳島大学大学院先端工学教育研究プロジェクト、科学技術振興機構・シーズ発掘試験(発掘型)(研究代表者＝三神 厚、課題番号13-014)による研究助成の一部を使用させて頂きました。また、防災科学技術研究所のKiK-net、K-NETサイトの地盤情報を活用させて頂きました。常時微動測定の実施にあたっては、元徳島大学大学院生の岡本輝正氏、松田敏和氏、現徳島大学大学院生の斉藤剛彦氏、その他の学生諸氏にご協力頂きました。以上、この場を借りて、感謝の意を表します。

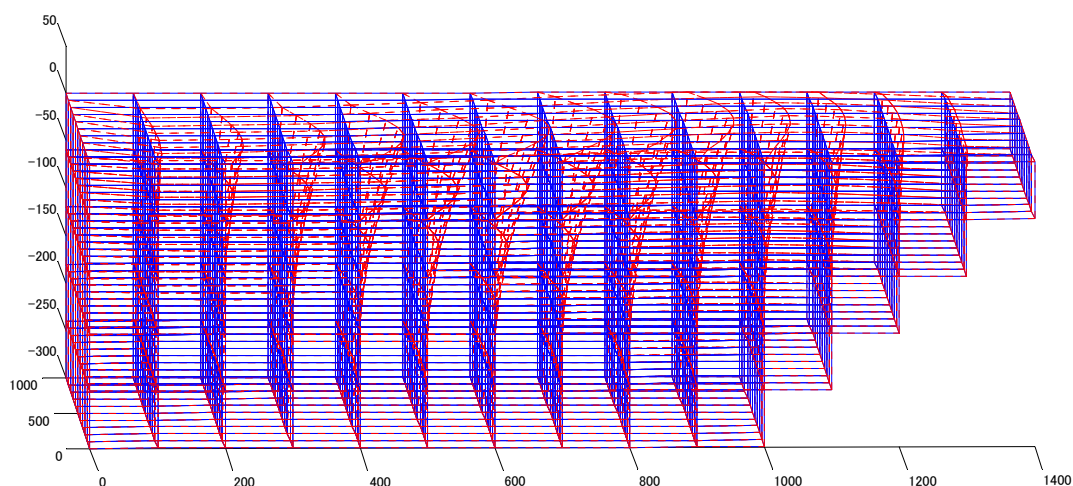


Fig.5 Computational result by 3D FEM

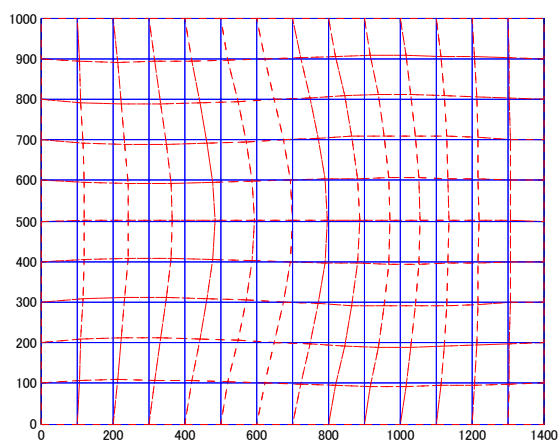


Fig.6 Computational result by 3D FEM (surface)

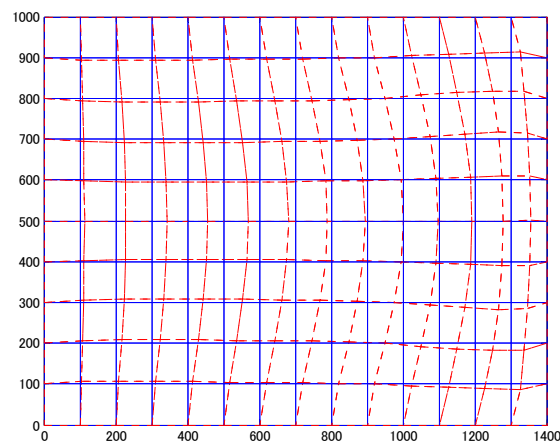


Fig.7 Computational result by Q3D Model
(surface, plane-strain)

参考文献

- 1) 田村重四郎, 鈴木猛康: 地下構造物の地震応答解析のための擬似3次元地盤モデルの提案—地盤モデルの構成, 生産研究, Vol.39, No.1, 37-40 (1987).
- 2) 中村 豊: 地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み, 第7回日本地震工学シンポジウム, 265-270 (1986).
- 3) 道上剛幸, 三神厚, 岡本輝正, 成行義文: 常時微動観測記録を用いた表層地盤構造の簡易推定, 土木学会四国支部第15回技術研究発表会講演概要集, 29-30 (2009).
- 4) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄巧: 常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と運用, 土木学会論文集, No.489/I-27, 251-260 (1994).
- 5) 国土地盤情報検索サイト KuniJiban,
<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/denshikokudo/>
- 6) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, p.190 (1994).
- 7) Matsuda, T., Mikami, A., Okamoto, T., Nakano, S., Okabe, T. and Nariyuki, Y.: Two-layer modeling of ground based on microtremor observations and its application to areas devastated by recent major earthquakes in Japan, Proc. The 14th World Conference on Earthquake Engineering (2008).
- 8) Nogami, T., Konagai, K. and Mikami, A.: Simple formulation of

ground impedance functions for rigid surface foundations, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.21, No.6, 475-484 (2001).

- 9) Tamura, C., Konagai, K. and Suzuki, T.: Earthquake response analysis of soft soil deposit on undulating bedrock, Report of the Institute of the Industrial Science, The University of Tokyo, Vol.36, No.5, 227-261 (1991).

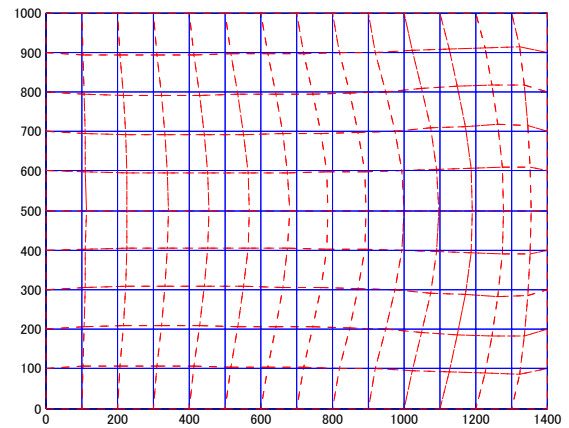


Fig.8 Computational result by Q3D Model
(surface, plane-stress)